

МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ

ЕПИФАНОВ В. П.

Рассматриваются экспериментальные зависимости напряжения от деформации, полученные при одноосном сжатии лабораторных образцов пресного льда определенной структуры и преимущественной ориентации кристаллитов относительно направления сжатия. Испытания выполнялись в интервале скоростей деформации от 10^{-7} до 10^{-2} с⁻¹, при температурах от -2 до -60° С. Показано важное значение трещинообразования в определении механических характеристик льда.

Исследованию механических свойств поликристаллического льда посвящено, как известно, большое количество работ [1-3], из которых можно получить представление о влиянии температуры [4, 5], скорости приложения нагрузки [6, 7], структуры льда [8, 9], преимущественной ориентации кристаллов относительно направления механического воздействия. Как правило, исследования ограничивались нахождением эмпирических соотношений между деформационными характеристиками и каким-либо одним внешним или внутренним фактором.

В публикуемой работе рассматривается влияние наиболее существенных факторов на механические свойства льда с единой позиции, например связи механических свойств со структурными изменениями в материале при деформировании.

Для решения поставленной задачи воспользуемся преимуществами комплексного метода исследования [10-12], в котором для лучшего понимания происходящих внутри материала изменений в процессе его деформирования применяются зондирующие акустические импульсы и регистрируются сигналы акустической эмиссии самого процесса макроразрушения. Метод дает возможность выявить важные детали процесса трещинообразования во льду в процессе его нагружения. Так, например, в [13] определены размеры образующихся трещин и их ориентация, в [14] оценено расстояние между берегами образующейся трещины, определены напряжения, при которых происходит зарождение и образование макротрещин.

1. Величины предельного напряжения σ_* при сжатии, определенные разными исследователями, отличаются почти на порядок [15]. Поэтому вначале были получены достоверно воспроизводимые величины предельного напряжения для образцов исследуемого льда.

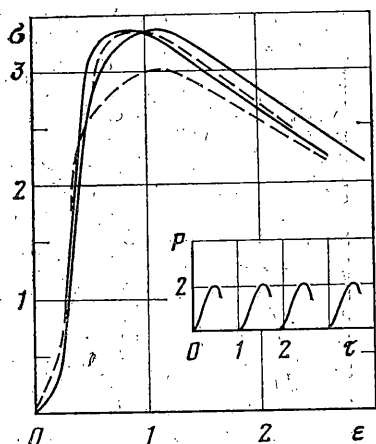
Лед приготавливался замораживанием дистиллированной воды, предварительно охлажденной до температуры $2-3^\circ$ С, в сосуде с теплоизолированными стенками и дном при температуре в холодильной камере минус $10-15^\circ$ С. Кристаллы росли с поверхности зеркала воды. Замораживание велось без специального перемешивания и механического воздействия на жидкость.

Из приготовленного таким образом куска льда размерами $30 \times 40 \times 80$ см вырезалась средняя наиболее однородная часть, а из полученного блока выпиливались заготовки размерами $4,5 \times 4,5 \times 10$ см. Из заготовки, большая ось которых была параллельна или перпендикулярна поверхности замерзания, изготавливались соответствующие образцы серии *R* и *L*.

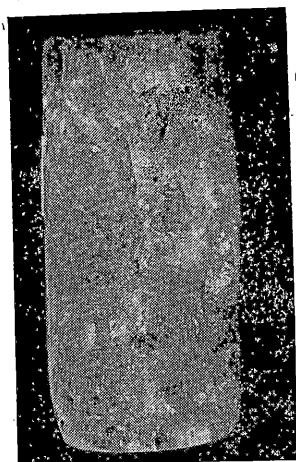
Заготовка помещалась в держатель, в котором она могла свободно вращаться вокруг большой оси. Осторожным оплавлением ей придавалась форма цилиндра. Предварительная обработка выполнялась при комнатной температуре на охлажденной до плюс $2-5^\circ$ С металлической плите. Доводка в размер заканчивалась в термощкафу при температуре -10° С. Исследовались образцы поликристаллического льда цилиндрической формы диаметром $30 \pm 0,1$ и высотой $60 \pm 0,6$ мм. Необходимая для акустических измерений параллельность торцев цилиндрических образцов обеспечивалась оплавлением на притирочном столе, состоящем из двух плоскопараллельных подвижных пластин. Перпендикулярность торцев к образующей цилиндра достигалась при помощи кольцевой обоймы. Как показали предварительные эксперименты, при таких условиях изготовления в образце не удается вызвать структурные изменения из-за теплового или механического воздействия. Подготовленный к испытаниям образец герметизировался и выдерживался при температуре измерений не менее 100 ч для снятия напряжений.

Образцы льда прозрачны, не содержат видимых включений. Тип льда столбчатый, характерный размер зерна $4-6$ мм, близкий к исследованному в [16]. Испытывались образцы льда с преимущественной ориентацией *C*-осей кристаллов вдоль *R* или перпендикулярно *L* образующей цилиндра. Плотность льда, определенная гидростатическим взвешиванием, $\rho = 0,91$, модуль упругости $E = \rho v^2$, где v — скорость продольной волны на частоте $2,5$ МГц, равен $5,7 \cdot 10^9$ Па.

На фиг. 1 показаны типичные диаграммы нагружения для образцов серии *R* (нагрузка P , кН; время τ , мин); скорость перемещения траверсы $5,1 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹, температура льда -20° С; приведены зависимости напряжения σ , МПа от продольной деформации ϵ , % для образцов льда этой же серии. Из экспериментальных данных следует, что разброс в определении предельного напряжения составляет $\pm 5\%$, — для такого чувствительного к разному рода внешним и внутренним факторам материала.



Фиг. 1



Фиг. 2

как лед, результат можно считать удовлетворительным. Этому способствовало также применение измерительной камеры с надежным термостатированием и с опорой на воздушной подушке, что позволило уменьшить градиент температуры в образце и предотвратить сколы в начальный момент нагружения. Существенно повлияло уменьшение механических и температурных воздействий при изготовлении образцов и, особенно, 100-часовая выдержка их перед испытанием при температуре опыта.

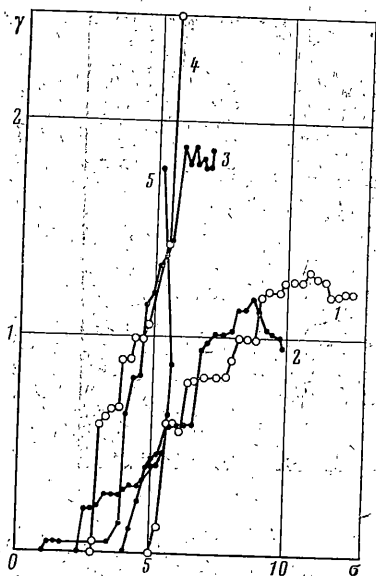
2. При одноосном сжатии образца льда в нем образуется множество трещин (фиг. 2), видимых невооруженным глазом. Первые трещины, как было отмечено в [17], появляются при напряжениях около 0,6 от предельного напряжения. Охарактеризовать размеры трещин по результатам микроскопических исследований [18] достаточно сложно. Наблюдаемые на шлифах изменения структуры с равной вероятностью могут быть результатом механического воздействия на лед как во время нагружения, так и при изготовлении шлифа из деформированного образца. Поэтому была предпринята попытка проконтролировать начало процесса при помощи неразрушающего метода, например по изменению характеристик зондирующего луча.

На фиг. 3 приведены зависимости нормированного сечения трещин γ от напряжения σ , МПа. Расчет выполнялся по данным измерений коэффициента ослабления $\alpha = \alpha_i - \alpha_0$ (где α_i и α_0 — соответственно коэффициенты ослабления звука в нагруженном и ненагруженном образце) с использованием установленной в [13] количественной связи между γ и α . Кривые 1–5 характеризуют процесс трещинообразования соответственно при температурах -60 , -50 , -30 , -20 и -9°C . Приведены типичные зависимости, относящиеся, однако, к отдельным образцам поликристаллического льда одной серии. Из рассмотрения этих зависимостей можно сделать вывод о корреляции напряжения, соответствующего началу образования макротрещины, с температурой льда: чем она ниже, тем большие напряжения необходимы для развития трещины. Кривая 3 не является, по-видимому, исключением, поскольку случайный скол не прорастает до напряжений, соответствующих температуре испытания. Явно выраженная корреляция свидетельствует в пользу диффузионного механизма трещинообразования.

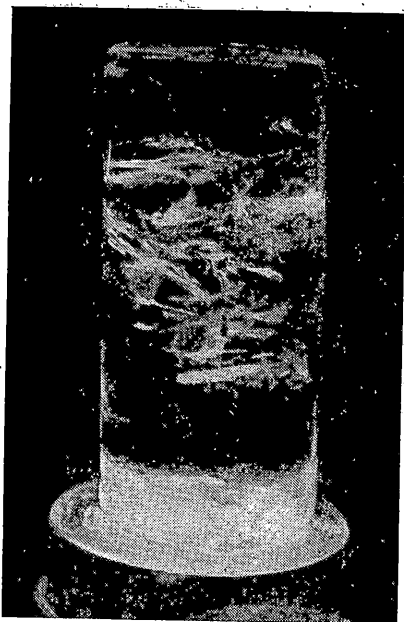
На кривых фиг. 3 можно выделить участки с малыми углами наклона относительно оси абсцисс, почти ступеньки, свидетельствующие о процессах перестройки и перераспределения напряжений. Уменьшение коэффициента ослабления перед ростом магистральной трещины [14] связано со смыканием берегов трещины.

Максимальные значения нормированного сечения трещин при температурах -60 , -50 и -40°C приблизительно одинаковы, что согласуется с представлениями об одинаковом повреждении материала перед ростом магистральной трещины. Однако этот критерий разрушения [18] оказывается справедливым лишь при разрушении с преобладанием хрупкого механизма, что при заданной скорости нагружения имеет место в интервале температур от -60 до -40°C . Для более высоких температур применимость этого критерия требует уточнения.

Если известны зависимости $\alpha(\tau)$ для трех зондирующих лучей, направленных вдоль осей z , y , x , то можно выявить существенные детали процесса трещинообразования. Ранее [13] отмечалось, что накопление повреждений при одноосном сжатии соответствует линейному закону, т. е. $\gamma = K_2 \sigma$, относительное сечение рассеяния образующейся трещины в процессе деформирования изменяется на порядок, причем первые видимые трещины при хрупком разрушении поликристаллического льда ориентированы вдоль оси сжатия. Углы ориентации вблизи $0,56\tau_*$, $0,62\tau_*$, $0,69\tau_*$ соответственно равны 7 , 30 , 31° . При расширении интервала температур была заме-



Фиг. 3



Фиг. 4

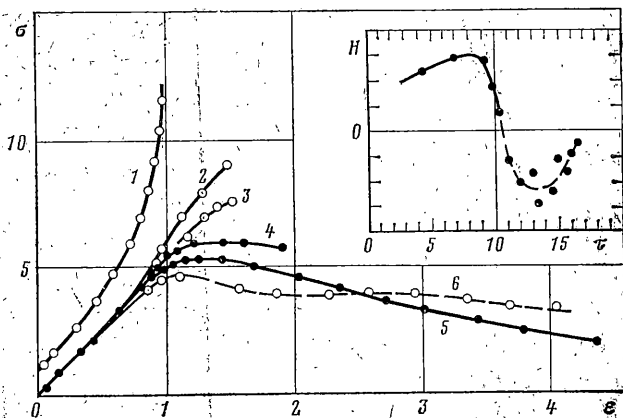
чена иная пространственная ориентация трещин. Например, при температуре -9°C к моменту максимальных напряжений в образце возникают трещины, ориентированные почти перпендикулярно направлению сжимающих усилий (фиг. 4), что может быть объяснено, по-видимому, разными причинами возникновения трещин. При пластическом деформировании трещины образуются в результате значительных деформаций под действием сдвиговых напряжений, при хрупком — при относительно малых деформациях под действием растягивающих напряжений.

Такое объяснение соответствует схематическим представлениям разрушения образцов горных пород [19], с той лишь разницей, что, например, для гранита переход от хрупкого типа разрушения к пластическому деформированию наблюдается в интервале температур от 20 до 500°C при изменении давления на 10^3 МПа, а для льда переход осуществляется в интервале температур от -60 до -5°C и при изменении давления всего лишь на 10 МПа. Это позволяет рассматривать лед как удобный модельный материал.

3. Переход от хрупкого разрушения льда к пластическому деформированию можно проследить на фиг. 5, где приведены зависимости напряжения σ , МПа от продольной деформации ϵ , % при различных температурах и постоянной скорости перемещения траверсы $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-5}$ с $^{-1}$. Кривые 1-6 соответствуют измерениям при -60 , -50 , -40 , -30 , -20 и -9°C . Линия 1 смещена вверх на 1 МПа.

Полное разрушение образцов при максимальных напряжениях, т. е. расчленение на осколки разной величины (фиг. 6), достигалось только в интервале температур от -60 до -30°C . Замечено, чем ниже температура, тем меньше размер осколков. Разрушение сопровождалось характерным треском. Анализ звуковых сигналов лавинообразного разрушения позволяет детально рассмотреть стадии процесса [10, 13]. Однако уже при температуре -30°C разрушению предшествуют значительные пластические деформации. О вынужденном течении материала свидетельствует участок кривой, параллельный оси абсцисс. Величина максимального напряжения σ_* уменьшается с повышением температуры. По мере приближения к точке плавления увеличивается пластичность материала. Сравнивая кривые 5, 6, соответствующие измерениям при температурах -20 и -9°C , можно заключить, что для достижения равных деформаций при более высокой температуре нужны большие напряжения, например, как это наблюдается при $\epsilon > 2,5\%$. Повышение сопротивляемости образца связано, по-видимому, с перестройкой структуры в деформируемом материале, в первую очередь с залечиванием дефектов. Вероятность этих процессов возрастает с повышением температуры. Несущее сечение деформированных образцов возрастает с различной залечиваемости трещин при разной температуре может оказаться неодинаковым. Поэтому для достижения равных деформаций достаточно иногда меньшего напряжения. На фиг. 7 показан образец, вид которого соответствует моменту снятия нагрузки в опыте, представленном кривой 5.

Дифференцирование кривой напряжения — деформация дает эффективный модуль упрочнения H , изменение которого во времени t , мин показано отдельно на



Фиг. 5

графике фиг. 5. Выбран промежуточный между хрупким разрушением и пластическим деформированием случай, показанный на фиг. 8. Изменение эффективного модуля качественно характеризует процессы структурных превращений в деформируемом материале, а отрицательные значения этой величины соответствуют разупорядочению материала [19].

В механике горных пород соответствующие области деформирования названы запредельными и их исследования связаны с изучением процесса возникновения макротрещин в образце, когда его, по-видимому, надо рассматривать не как кусок сплошного материала, но как некоторую сложно сочлененную конструкцию, которая обладает следующей особенностью. При сжатии основной вклад в продольную деформацию вносят элементы, работающие на растяжение. Например, в четырехугольнике $ABCD$, при условиях приложения сжимающей силы в точках A, C и шарнирного сочленения в точках A, B, C, D , диагональ BD будет работать на растяжение. Совокупностью таких элементов, соединенных в объемную конструкцию, можно будет, по-видимому, моделировать механические свойства льда при сжатии. Такая модель очень близка к модельному представлению дилатансионного поведения горных пород при деформировании [20].

Граница между сплошным образом и конструкцией может быть проведена в момент резкого увеличения коэффициента ослабления зондирующего импульса и генерации сигнала акустической эмиссии. На фиг. 8 приведены зависимости, характеризующие изменение нагрузки P , κH (1), продольной деформации ε , % (3) и коэффициента ослабления α , см^{-1} (2), а также запись сигналов акустической эмиссии амплитудой A , V во времени τ , мин. С момента образования макротрещины начинается новый период разрушения. Первый соответствует зарождению и накоплению микротрещин, во втором периоде идут процессы накопления трещин, их взаимодействие, процессы залечивания.

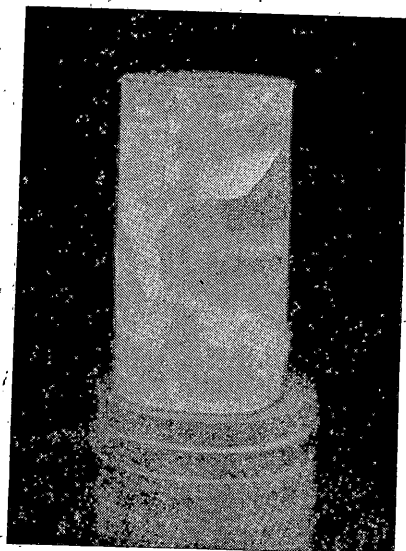
Визуальные наблюдения позволяют обнаружить появление только первых трещин в прозрачных образцах. Потеря прозрачности при накоплении трещин делают визуальный способ наблюдения непригодным. Акустические методы позволяют контролировать процесс трещинообразования на всех стадиях деформирования, включая лавинообразное разрушение.

Экспериментальные данные, приведенные на фиг. 8, позволяют убедиться, что образование трещин происходит не непрерывно, а дискретно. Это подтверждается дискретностью сигналов акустической эмиссии, регистрируемая минимальная амплитуда которых соответствует образованию видимой трещины. Наибольшая интенсивность сигналов акустической эмиссии наблюдается вблизи максимальных напряжений σ . Коэффициент ослабления зондирующего импульса, являясь интегральной характеристикой, позволяет получить представление о суммарных изменениях структуры в процессе деформирования. Совместное рассмотрение двух экспериментальных зависимостей, например интенсивности сигналов акустической эмиссии и изменения коэффициента ослабления во времени, позволяет сделать некоторые предположения о структурных изменениях в деформируемом льде. Так, слабое изменение амплитуды зондирующего акустического сигнала при интенсивном звукообразовании в запредельной области подтверждает сделанное ранее предположение о смыкании берегов трещин, т. е. своеобразном динамическом равновесии двух процессов: залечивании невыгодно ориентированных трещин и образовании новых в таком соотношении, что коэффициент ослабления изменяется незначительно.

4. Процесс трещинообразования не сводится только к возникновению разрыва сплошности в материале и сбросу локальных перенапряжений. Для льда не менее



Фиг. 6

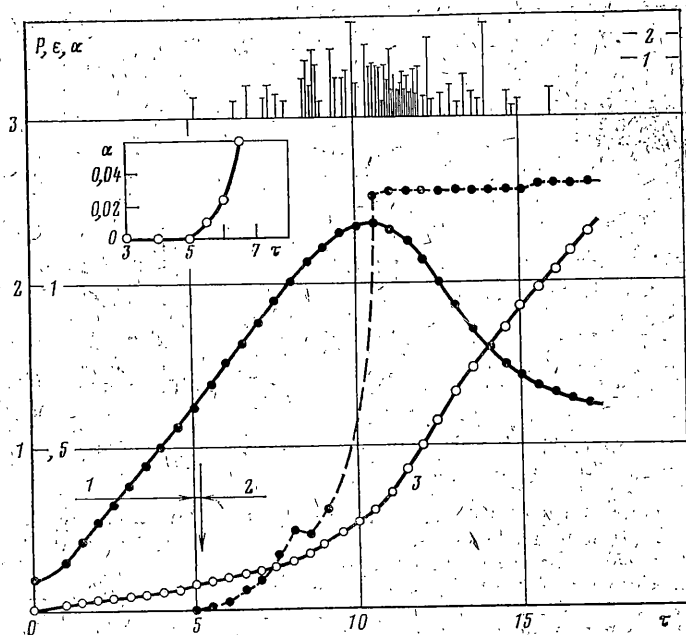


Фиг. 7

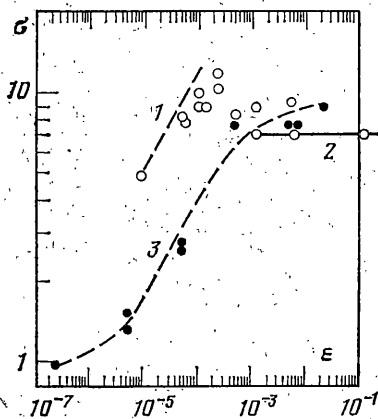
важной является следующая за разрывом перестройка структуры, которая «помогает приспособиться» льду к новому полю напряжений. По времени эти два явления — собственно образование трещины и структурная перестройка — могут существенно различаться. Время структурной перестройки определяется сдвиговой вязкостью льда $\tau_1 = G / \eta$, где G — модуль сдвига, η — сдвиговая вязкость. Согласно [14], величина τ имеет порядок 10^3 с. Время прорастания трещины в образце может быть оценено по частоте сигналов акустической эмиссии [14]. Эта оценка дает значения $\tau_2 = 5 \cdot 10^{-4}$ с. Хрупкого разрушения льда можно ожидать при $\dot{\epsilon} > \tau_2^{-1}$. Пластическая деформация будет реализоваться при $\dot{\epsilon} < \tau_1^{-1}$, т.е. при медленном деформировании. В промежуточных случаях должен наблюдаться переходный процесс с сильной зависимостью предельного напряжения от скорости деформирования.

Экспериментальная зависимость величины предельного напряжения σ , МПа от скорости деформации $\dot{\epsilon}$, s^{-1} для поликристаллического льда с преимущественной R -ориентацией зерен представлена кривой 3 на фиг. 9. Сравнение с известными данными позволяет отметить, что в области малых $\dot{\epsilon}$ с увеличением скорости деформирования предельные напряжения возрастают, как это проиллюстрировано кривой 1 из [16]. Однако возрастание ограничено интервалом некоторых $\dot{\epsilon}$, когда величина предельного напряжения изменяется настолько незначительно, что зависимость $\sigma_*(\dot{\epsilon})$ может быть представлена согласно [16] отрезком прямой 2, параллельной оси абсцисс. Сопоставление кривой 3 с линиями 2 и 1 позволяет отметить, что в области больших $\dot{\epsilon}$ получается хорошее совпадение публикуемых данных с приличественное различие, хотя общая тенденция к уменьшению σ_* с уменьшением $\dot{\epsilon}$ сохраняется. Несовпадение данной кривой 3 и 1 в [16] можно, по-видимому, объяснить разной ориентацией кристаллов относительно приложенной нагрузки и некоторых различий в структуре исследуемых образцов льда, что особенно проявляется в промежуточных случаях, когда скорость деформации соизмерима со скоростью структурной перестройки.

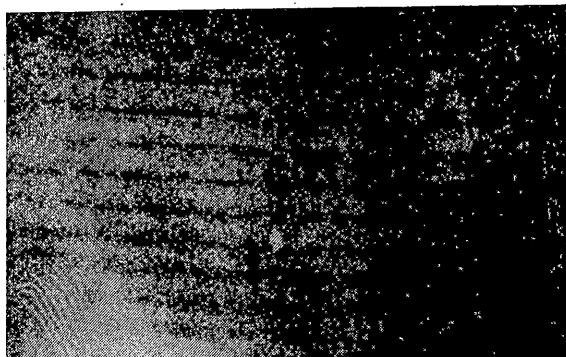
Перегиб кривой 3 приходится на интервал скоростей вблизи $4 \cdot 10^{-4} s^{-1}$, что соответствует характерному времени $3 \cdot 10^3$ с, т.е. величине, соизмеримой с временем релаксации льда. Основываясь на корреляции этих величин, можно объяснить вид кривой 3. С увеличением скорости деформации процессы структурной перестройки не успевают завершиться, что создает условия для роста трещин в местах локального перенапряжения. Происходит «охрупчивание» льда, преимущественным становится процесс роста трещин, образец разрушается. Дальнейшее увеличение $\dot{\epsilon}$ перестает влиять на величину σ_* . Возможно, что при скоростях деформирования, больших скорости роста трещины, последует дальнейшее увеличение σ_* .



Фиг. 8



Фиг. 9

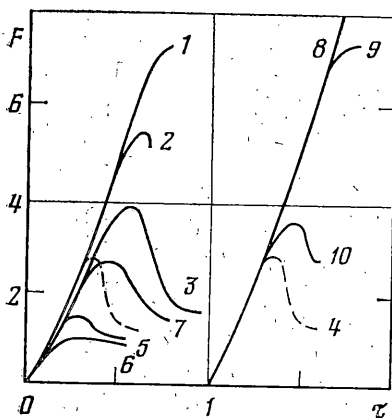


Фиг. 10

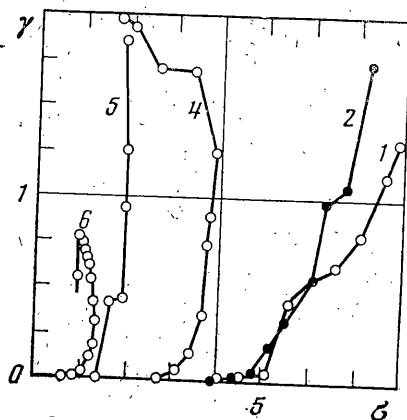
При малых скоростях деформирования успевают происходить выравнивание напряжений по объему образца, что создает условия для относительно равномерной работы всего несущего сечения. Поэтому профиль деформированного образца близок к бочкообразному. По мере увеличения ϵ количество трещин в образце возрастает, а протяженность площадки текучести на кривых $\sigma(\tau)$ уменьшается. Этому диапазону скоростей деформации соответствует режим интенсивной дилатансии, возможно отклонение от однородного деформирования.

5. В полимерном льде, приготовленном замораживанием водного раствора полиэтиленоксида концентрацией $4 \cdot 10^{-5}$ г/г молекулярной массы $5 \cdot 10^6$, наблюдается чередование прозрачных и опалесцирующих слоев, расположенных параллельно поверхности заморозки (фиг. 10). При микроскопических исследованиях в опалесцирующих слоях были обнаружены ячейки, заполненные полимерным раствором. Средний размер ячеек около 0,03 мм. Условия роста льда определяют характерные размеры субструктур. В рассматриваемом случае толщина прозрачного слоя была 0,6 мм, а опалесцирующего — 1,6 мм.

На фиг. 11 показаны диаграммы нагружения для полимерного льда при основном сжатии: кривые 1-7 и 8-10 относятся соответственно к образцам серии R и L. По оси абсцисс отложено время τ , ч, по оси ординат — сила F , кН. Измерения вы-



Фиг. 11



Фиг. 12

полнены при температурах -60 (1), -50 (2, 8), -40 (3), -30 (7), -20 (4, 9), -10 (5, 10) и -5°C (6) и при скорости перемещения траверсы $5 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$.

Предельное сопротивление зависит от температуры льда и его структурных особенностей. Полным разрушением предельное состояние заканчивается только в случаях, представленных кривыми 1, 2, 8 и 9, а в остальных наблюдается пластическое деформирование, сопровождающееся трещинообразованием. В анизотропии механических свойств исследуемых образцов можно убедиться сопоставляя кривые 2-8, 4-9 и 5-10, полученные соответственно при температурах -50 , -20 и -10°C . Существенно меньшие значения предельных усилий для образцов серии R в измерениях при одинаковой температуре не противоречат известному факту меньших предельных усилий, необходимых для сдвига в базисной плоскости. Анизотропия механических свойств, как это следует из экспериментальных данных, значительно уменьшается с повышением температуры льда.

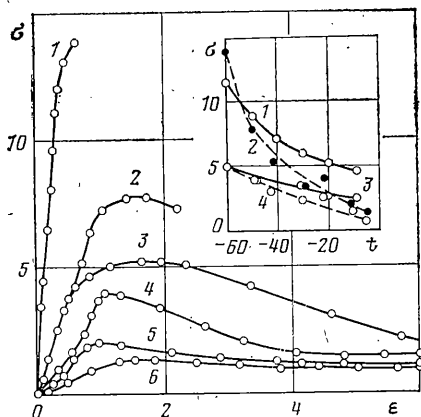
На фиг. 12 приведены зависимости нормированного сечения трещин γ от напряжения σ , МПа для различных температур. Обозначения кривых те же, что на фиг. 11. Естественно было ожидать существенного уменьшения скорости микротрещинообразования при введении в лед частиц с большой молекулярной массой, а следовательно, и уменьшения влияния температуры на пороговое напряжение, соответствующее образованию первой макротрещины. Однако, как следует из экспериментальных данных, сильная зависимость порогового напряжения от температуры по-прежнему сохраняется. Объясняется это, по-видимому, тем, что полимер находится во льду только в ячейках, т. е. в виде гетерогенных включений.

Трещинообразование определяется температурой льда не только в начальной стадии. О зависимости процесса накопления трещин от температуры можно судить по изменению вида кривых (фиг. 12). Например, уменьшение γ , что явно наблюдается при температуре -5°C (кривая 6), соответствует залечиванию трещин. Для остальных кривых это не так заметно, поскольку при более низких температурах преобладает процесс образования трещин. Однако влияние залечивания на процесс разрушения весьма существенно, в частности им объясняется сохранение образцом несущей способности в течение всего эксперимента.

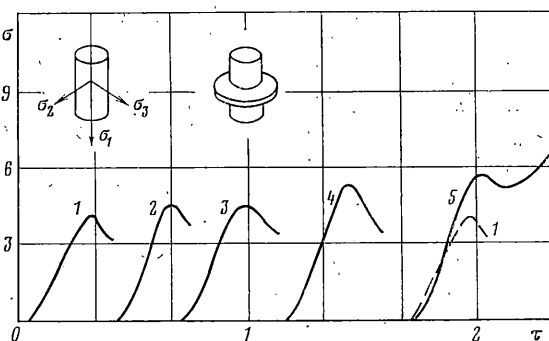
На фиг. 13 приведены зависимости напряжения σ , МПа от продольной деформации ϵ , % для образцов полимерного льда серии R. Нумерация кривых соответствует введенным ранее обозначениям. Сравнение с аналогичными зависимостями для льда, полученного замораживанием дистиллированной воды, позволяет отметить, что полимерный лед более пластичен. Предельные деформации для него больше, и хрупкое разрушение происходит при температуре -50° и ниже, а для льда без полимерной добавки распад образцов на столбчатые осколки можно наблюдать почти до -20°C .

Зависимости предельных 1, 2 и пороговых 3, 4 напряжений σ от температуры t , $^{\circ}\text{C}$ для полимерного льда 2, 4 и льда, полученного замораживанием дистиллированной воды 1, 3, приведены отдельно на графике фиг. 13. В обоих случаях наблюдается уменьшение напряжений с повышением температуры. Несовпадение кривых 1, 2, а также 3, 4 позволяет отметить влияние полимерной добавки, выражающееся в усилении рассматриваемой зависимости, особенно заметное при повышении температуры. Для полимерного льда экспериментальные точки не так хорошо ложатся на гладкую аппроксимирующую кривую, что можно объяснить изменением фазового состояния связанного растворителя.

При температуре -60°C полимерный лед, если судить по значениям σ , оказывается более прочным, по-видимому, вследствие уменьшения хрупкости. Пластичность в этом случае может достигаться в результате остановки трещин на ячейках.



Фиг. 13



Фиг. 14

Суммарный эффект таких остановок растущих трещин на включениях проявляется в кажущемся увеличении пластичности льда с полимерной добавкой. Ячейки с полимером, с одной стороны, являются концентраторами напряжений, облегчающими возникновение макротрещин, а с другой стороны, возникшие трещины могут прекращать свой рост на этих ячейках, что способствует в условиях одноосного сжатия квазиравномерному распределению напряжений по объему образца.

6. На фиг. 14 приведены диаграммы нагружения образцов льда серии *L*. Первый образец нагружался при условии $\sigma_3 = \sigma_2 = 0$. Деформирование других образцов в радиальном направлении было ограничено кольцами из оргстекла. Количество колец для образцов 2–5 было соответственно 1, 2, 4 и 9. Применение ограничивающих колец позволило последовательно приближать условия деформирования лабораторных образцов к условиям деформирования льда в природе, т.е. $\sigma_3 \sim \sigma_2 \neq 0$. Изменение условий деформирования привело к увеличению предельных напряжений и к изменению вида кривых $\sigma(\tau)$.

Количественная обработка результатов измерений для льда все еще остается затруднительной не только вследствие разброса экспериментальных результатов, но прежде всего из-за возможного влияния геометрических размеров образцов, которое трудно учесть, но легко принять за свойство материала. Кроме того, существенным является влияние малых примесей на механические свойства льда. Затруднена количественная идентификация структур льда. В дальнейшем предполагается использовать точные методы исследования, воспроизводить в лабораторных испытаниях условия напряженного состояния, подобные реальным, и давать математическое описание механических свойств в инвариантной форме. Тем не менее выполненные исследования позволяют выявить основные закономерности процесса деформирования льда и предложить в развитие [21] реологическое соотношение

$$(\Delta \epsilon - \Delta \epsilon_0) = \lambda [| \epsilon_1 - \epsilon_2 | - | \epsilon_{01} - \epsilon_{02} |]$$

где $\Delta \epsilon_0$, ϵ_{01} , ϵ_{02} — соответственно объемная, продольная и поперечная деформации, при которых начинается процесс макротрещинообразования.

Автор благодарит Н. Х. Арутюняна и В. Н. Николаевского за постоянное внимание и интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богородский В. В., Гаврило В. П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 384 с.
2. Physics and Mechanics of Ice. IUTAM Symposium. В.: Springer, 1980, p. 129–146.
3. Войтковский К. Ф. Механические свойства льда. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 100 с.
4. Gold L. W. The failure process in columnar-grained ice. — In: Nat. Res. Couns. Can. Div. Build Res. Techn. Pap., 1972, No. 369, p. 164.
5. Yamaji K., Kuroiwa D. Visco-elastic property of ice in temperature range 0–100° C. — Low Temperature Sci. Ser. A, 1956, No. 15, p. 171–183.
6. Лавров В. В. Деформация и прочность льда. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 208 с.
7. Traetteberg A., Gold L. W., Fréderking R. The strain rate and temperature dependence of Young's models of ice. — In: Proc. 3d. Internat. Sympos. of Ice Problem. Hanover: 1975, p. 313–327.
8. Шумский П. А. Основы структурного ледоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 492 с.

9. Шушерина Е. П., Гуликов А. Е. Влияние строения льда на его механические свойства.— Мерзлотные исследования: Сб. статей. М.: Изд-во МГУ, 1964, вып. 4, с. 376—380.
10. Воронина И. Ю., Епифанов В. П. Акустические исследования структурных изменений гранита при осевом сжатии.— Акуст. ж., 1980, т. 26, вып. 3, с. 371—376.
11. Епифанов В. П. Кинетика образования и накопления повреждений в высоконаполненном каучуке.— Механ. композит. материалов, 1982, № 3, с. 552—554.
12. Епифанов В. П., Фаустов М. А. Метод оценки изменения напряженного состояния вязкоупругого тела.— Заводск. лаборатория, 1982, т. 48, № 5, с. 67—69.
13. Епифанов В. П., Фаустов М. А. Изменение эффективного сечения трещин при деформировании льда.— Изв. АН СССР. МТТ, 1982, № 6, с. 171—176.
14. Епифанов В. П. К вопросу о механических свойствах льда.— Изв. АН СССР. МТТ, 1982, № 1, с. 187—192.
15. Уикс У. Ф., Ассур А. Разрушение озерного и морского льда.— В кн.: Разрушение. Т. 7. Ч. 1. М.: Мир, 1976, с. 513—623.
16. Каргер Д. С. Хрупкое разрушение поликристаллического льда при сжатии.— В кн.: Лед и его воздействие на гидротехнические сооружения. Л. Всес. н.-и. ин-т гидротехн., 1972, с. 69—79.
17. Gold L. W. The process of failure of columnar-grained ice.— Philos. Mag., 1972, v. 6, No. 2, p. 311—323.
18. Зарецкий Ю. К., Чумичев Б. Д. Кратковременная ползучесть льда. Новосибирск: Наука, 1982. 119 с.
19. James R. Rice. On the stability of dilatant hardening for saturated rock masses.— J. Geophys. Res., 1975, v. 80, No. 11, p. 1531—1536.
20. Николаевский В. Н. Дилатанция и теория очага землетрясения.— Успехи механики, 1980, т. 3, № 1, с. 71—101.
21. Епифанов В. П. Разрушение поликристаллического льда.— Докл. АН СССР, 1982, т. 267, № 6, с. 1364—1367.

Москва

Поступила в редакцию

12.VII.1983

УДК 539.374

ЭФФЕКТИВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ В КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ТЕОРИИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

АРХИПОВ И. К., ТОЛОКОННИКОВ Л. А.

При помощи статистической модели случайного поля упругопластических жесткостей, разработанной на основе теории полумарковских случайных процессов, получены компоненты корреляционного тензора упругопластических жесткостей. При этом случайные поля деформаций предполагаются статистически однородными, а поля жесткостей — статистически изотропными (гипотеза сильной изотропии В. В. Болотина [1]). Характеристики распределения размеров микропластических зон, необходимые для вычисления корреляционного тензора, определяются приближенно по характеристикам соответствующей краевой задачи статистической теории упругости [2].

В корреляционном приближении получены определяющие эффективные соотношения в хаотически армированном композите. Сравняются экспериментальные и расчетные диаграммы нагружения для некоторых композитов. Указывается, что даже для идеально пластических законов деформирования без упрочнения компонентов композит ведет себя как упругопластическая среда с нелинейным упрочнением. Рассматривается также знакопеременное одноосное нагружение. В этом случае получены определяющие эффективные соотношения для произвольного цикла нагружения с учетом циклического упрочнения материала матрицы.

Предположим статистическую однородность и изотропию полей упругопластических жесткостей в стационарном поле деформаций. Тогда каждое из полей может быть охарактеризовано заданием свойств одномерного поля, которое получается сечением поля вдоль прямой произвольного направления. Корреляционная функция и математическое ожидание по сечению совпадают с соответствующими характеристиками всего поля [3], при этом корреляционная функция зависит лишь от модуля радиус-вектора r произвольной точки поля.

Рассмотрим поле, образованное упругопластическими жесткостями в хаотически армированном композите, предполагая только упругую деформацию упроч-